

고온초전도 자석 기반 대용량 파력발전을 통한 100MW급
대규모 그린수소 생산 플랜트 구축 사업

시스템 설계부터 경제성 분석까지

서울대학교 전기정보공학부

장원석

구경모

방제석

목 차

I. 서론

1. 고온초전도 자석 분야 파괴적 혁신기술의 탄생 및 제조산업 전반의 파급 효과
 - 1.1 무절연 고온초전도 기술을 통한 고온 초전도자석 분야 상용화 난제 해결
 - 1.1.1 고온초전도 상용화의 최대 난제, 퀘칭(Quench)에 의한 코일 손상
 - 1.1.2 무절연 초전도 기술의 퀘칭(Quench)에 의한 손상 예방 상용화 난제 해결
 - 1.2 무절연 고온초전도 기술의 제조산업 파급 효과
 - 1.2.1 MIT-Commonwealth Fusion System의 차세대 초소형 핵융합 장치 프로젝트
 - 1.2.2 NASA의 초전도 모터 기반 신개념 분산전기동력추진 시스템
 - 1.2.3 덴마크 EcoSwing의 초전도 풍력발전기 상용화 개발
2. 재생에너지 생태계의 지각변동을 가져올 고온초전도 자석 기반 파력발전
 - 2.1 기술적 가용 부존량 20GW에 이르는 국내의 잠재 파력 에너지원
 - 2.2 국내의 파력발전 기술개발 현황: 제주도의 전국 유일 500kW급 파력발전소
 - 2.3 고온초전도 선형 파력 발전기를 활용한 대용량 파력발전의 현실화
3. 고온초전도 자석 기반 파력 연계 그린수소의 대량 생산 및 보급 실현
 - 3.1 수소 사회로의 전 세계적 에너지 대전환
 - 3.2 탄소중립 수소경제의 완성을 위한 그린수소로의 전환의 필요성
 - 3.2.1
 - 3.2.2 최적의 재생에너지 연계 수소 생산 방식, 수전해
 - 3.3 액화수소 강점 및 국가 전략적 필요성
 - 3.3.1 타 저장 방식 대비 액화수소의 강점: (1) 안전성 (2) 뛰어난 저장 및 운송효율 (3) 낮은 요구면적
 - 3.3.2 액화수소의 국가 전략적 필요성

II. 고온초전도 자석 기반 선형 파력발전기

1. 고온초전도 선형 파력 발전기의 개념 구조
2. 고온초전도 선형 파력 발전기 설계 최적화 및 최종 디자인

III. 파력발전 연계 대규모 그린수소 생산 플랜트의 시스템 설계

1. 고온초전도 기반 파력 발전 팜(farm) 배치
2. 파력 발전 연계 그린수소 생산 플랜트 설계 및 연간 수소 생산량 전망

IV. 파력발전 연계 그린수소 생산, 운송 및 활용 전 주기 열역학 분석

1. 고온초전도 파력 발전기의 액화수소 냉각 과정 열역학 분석
2. 수전해를 통한 수소 생산에서 활용까지 전 주기 열역학 해석
 - 2.1 수소의 액화 공정 열역학 해석
 - 2.2 액화수소의 저장 및 운송 과정 열역학 해석

V. 파력발전 연계 대규모 그린수소 생산 플랜트의 경제성 분석

1. 액화수소 냉각에 따른 초전도 전력기기의 비용 감소 및 성능 향상
2. 고압기체수소와 액화수소의 경제성 비교 분석
 - 2.1 액화 및 운송에서의 경제성 분석
 - 2.2 충전소에서의 경제성 분석

VI. 결론

초 록

르 르 르

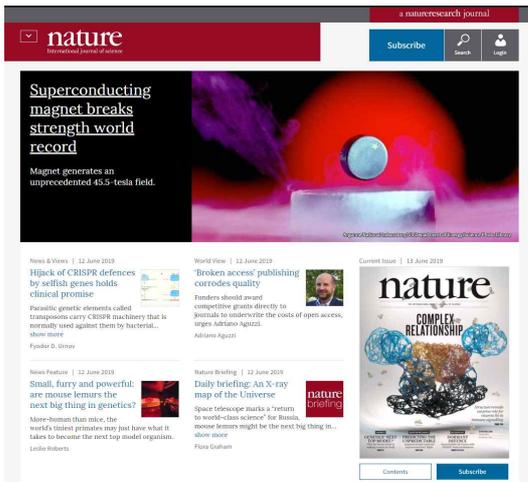


그림 1. 2019년 6월 네이처(Nature) 홈페이지 메인에 소개된 무절연 고온초전도 코일 기반 자석의 직류자기장 세계 최고 기록 달성

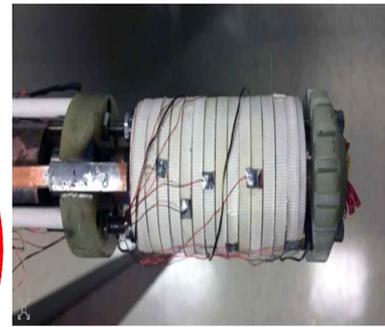
I. 서론

1. 고온초전도 자석 분야 파괴적 혁신기술의 탄생 및 제조산업 전반의 파급 효과

1.1 무절연 고온초전도 기술을 통한 고온 초전도자석 분야 상용화 난제 해결

초전도 현상이란 물질 고유의 임계온도 이하에서 전기저항이 사라지는 현상이다. 이를 응용하면 초전도 현상을 띠는 도체에 대전류를 손실 없이 흘릴 수 있다. 초전도 응용 기술은 발전, 송전, 전기저장, 대전력기기 등 전기에너지의 전 분야에서 응용이 가능하여 에너지 분야에 매우 큰 파급 효과를 가져올 것으로 전망한다.

고온 초전도체는 초전도 현상이 일어나는 물질 중 임계온도가 30K 이상인 물질을 일컫는다. 고온 초전도체는 기존 상전도체 대비 월등한 성능을 보이나,



Little Big Coil: the record-breaking magnet is the size of a toilet roll core. (Courtesy: Stephen Bilenky/National MagLab)

"Little Big Coil" creates record-breaking continuous magnetic field
To Seungyong Hahn and colleagues at the National High Magnetic Field Laboratory (MagLab) in Tallahassee, Florida for creating the highest continuous magnetic field ever in the lab. The

그림 2. 무절연 고온초전도 코일 기반 자석의 영국물리학회 산하 Physic World 선정 "Top 10 Breakthroughs for 2019" 등재

기기 운전 중 초전도 현상이 순간적으로 사라지는 퀘치(Quench) 현상이 나타나는 순간 코일이 타버리는 현상으로 인해 운전 안정성의 심각한 결함으로 최근까지 상용화의 기술적 장벽을 넘지 못하였다.

그러나 서울대학교 한승용 교수가 지난 2011년 미국 MIT 재직 시절 '무절연 고온 초전도자석'이라는 새로운 기술 패러다임을 세계 최초로 제안하였다¹⁾²⁾. 이에 따라 제작된 무절연 고온초전도 자석은 퀘치(Quench) 현상 시 코일의 손상을 효과적으로 방지함에 따라 초전도 자석의 운전 안전성을 비약적으로

1) S. Hahn, D. Park, J. Bascuñán, et al., "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, No. 3, 2011.

2) X. Wang, S. Hahn, Y. Kim, et al., "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation ReBCO pancake coil", Supercond. Sci. Technol., Vol. 26, No. 3, 2013.



그림 3. 미국 MIT 스펀오프 스타트업 CFS의 무절연 초전도 코일 기반 차세대 초소형 핵융합 장치 기술 로드맵 (출처: MIT-CFS)

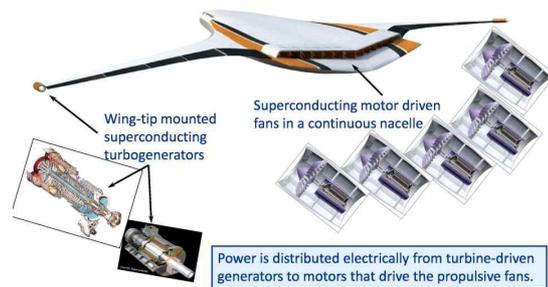


그림 4. 미국항공우주국(NASA)의 초전도 모터를 탑재한 신개념 분산전기동력추진 시스템 장착 전기추진 항공기 개념도 (출처: NASA)

향상시켜 고온 초전도자석 상용화의 최대 난제를 해결하였다.

이후 2019년 한승용 교수는 미국 국립 고자기장 연구소와 공동 연구를 통해 무절연 고온초전도 코일을 이용한 직류 자기장 세계 최고 기록인 45.5T를 달성하였고, 이전 세계기록을 달성한 자석 대비 크기와 무게를 1/100 이하로 줄이는 초소형화를 함께 달성하였다³⁾.

이러한 연구 성과는 고자기장 발생 기술의 패러다임을 바꾼 것으로 평가되었고, 2019년 6월 당시 네이처(Nature) 본지 홈페이지 메인에 소개되었으며, 2019년 12월 영국 물리학회 산하 Physics World에서 주관한 “Top 10 Breakthroughs for 2019” 에 구글(Google)의 Quantum Supremacy(양자 우위) 달성, 블랙홀의 사상 첫 이미지 관측 성공과 나란히 선정되었다.

3) Hahn, S., Kim, K., Kim, K. et al., “45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet” , Nature 570, 2019.

1.2 무절연 고온초전도 기술의 제조산업 파급효과

1.2.1 MIT-Commonwealth Fusion System의 초소형 핵융합 장치 프로젝트

2018년 미국 MIT의 스펀오프(spin-off) 스타트업 Commonwealth Fusion System(이하 CFS) 사는 무절연 고온 초전도 기술을 적용하여 현재 프랑스에서 건설 중인 25m 높이의 국제핵융합실험로(ITER)를 4m 이하로 초소형화 시켜 핵융합 장치의 비용 및 기술의 상용화 시기를 30년 이상 획기적으로 단축시키는 목표로 하는 로드맵을 발표하였고, 현재 차세대 초소형 핵융합 장치 ‘ARC Tokamak’ 의 개발 중에 있다. 민간 영역으로부터 115만 달러 규모의 투자를 받았으며, 이후 빌 게이츠로부터 “Top 10 Breakthrough Technologies of 2019” 선정과 함께 추가 투자를 받았다.

1.2.2 NASA의 초전도 모터 기반 신개념 분산전기동력추진 시스템

미국항공우주국(NASA)은 2035년까지
신개념 분산전기동력추진 시스템을
개발하여 전기추진 항공기에 장착할 개발
계획을 진행하고 있으며, 이 시스템에는
고출력밀도의 초전도 모터와 발전기가
탑재될 예정이다⁴⁾.

1.2.3 덴마크 Ecoswing의 초전도 풍력발전기 상용화 개발

유럽의 9개사가 컨소시엄을 이루어
진행중인 EcoSwing (Energy Cost
Optimization using Superconducting Wind
Generators) 프로젝트는 세계 최초의
초전도 기반 3.6MW급 직접 구동 풍력
발전기 개발 프로젝트이다⁵⁾. 이는 세계
최대 규모의 초전도 발전기 관련
프로젝트이며, 실증 시험까지 모두 마치고
상용화를 목전에 둔 상태이다⁶⁾.

2. 재생에너지 생태계의 지각변동을

- 4) Sean Clarke, "Aircraft Electric Propulsion Systems: Applied Research at NASA", 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, 2015.
- 5) T Winkler and on behalf of the EcoSwing Consortium, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2019.
- 6) X. Song, C. Bühner, P. Brutsaert, et al., "Ground Testing of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator", IEEE Trans. Energy. Conv. Vol. 35, No. 2, 2020.

가져올 고온초전도 자석 기반 파력발전

2.1 기술적 가용 부존량 20GW에 이르는 국내의 잠재 파력 에너지원

우리나라의 경우 2017년 정부가 발표한
'재생에너지 3020 이행계획'에 따르면⁷⁾,
2030년까지 재생에너지 발전량 총 63.8GW
중 태양광과 풍력이 54.2GW의 비중을
차지하며 이는 전체의 약 85%에
해당한다. 이처럼 태양광과 풍력에
신재생에너지의 비중이 과도하게 편중된
현상을 해소하기 위해 추가적인
신재생에너지원의 발굴이 절실하다.

파력 발전은 국토의 삼면이 모두
바다에 둘러싸인 한반도 지형의 강점을
활용함과 동시에 해상풍력 및 해상
태양광과의 연계, 풍부한 부존량 등 제
3의 신재생에너지원이 될 잠재력이 있다.

아래의 표 1은 국내의 부존 파력
에너지원 잠재량을 설비용량으로 나타낸
것이다. 선박해양플랜트연구소에서 제공한
각 지역의 유의파고 및 에너지주기
자료를 바탕으로 단위면적당 이론적으로
추출할 수 있는 에너지 잠재량인
API(Average Power Intercepted)를
정의하여 산정하였다. 기술적 잠재량은
선박해양플랜트연구소에서 개발한 부유식
진자형 파력발전장치의 시스템 효율 및
이용률을 적용하였다⁸⁾.

7) 산업통상자원부, 재생에너지 3020 이행계획 (안), 2017.

8) 산업통상자원부, 한국에너지공단 신재생에너지센터, 2020 신재생에너지백서, 2020.



그림 5. 제주도 한경면 용수리 500kW급 진동수주형 파력발전소 (출처: 헤드라인제주)



그림 6. Carnegie Clean Energy 사의 점흡수식 파력발전기 CETO5 배치 개념도. (출처: Carnegie Clean Energy)

	이론적 잠재량	기술적 잠재량
설비용량(GW)	129	18

표 1. 국내 파력에너지원 잠재량

2.3 국내의 파력발전 기술개발 현황: 제주도의 전국 유일 500kW급 파력발전소

국내엔 아직 파력발전이 상용화되어 운전 중인 설비로는 유일하게 제주도에 한경면 용수리 1.2km 앞 해상에 위치한 설비용량 500kW급 파력발전소가 있다. 가로 37m, 세로 35.2m, 높이 27.5m의 거대한 콘크리트 구조물로, 진동수주형 파력 발전기다.

2.4 고온초전도 선형 파력 발전기를 활용한 대용량 파력발전의 현실화

본 논문에서 설계한 무절연 초전도 기술을 적용한 초전도 선형 파력 발전기는 1MW의 출력 성능을 가진다.

그림 6에 제시된 Carnegie Clean Energy 사의 파력발전기와 동일한 점흡수식이며, 부표를 제외한 발전이 이루어지는 발전기의 질량은 2.133 t이며 부피는 1.51 m³이다.

매우 높은 운전 안전성을 바탕으로 대전류를 흘릴 수 있는 무절연 고온 초전도 기술을 활용해 1MW라는 고출력 성능과 발전기의 소형화를 동시에 달성하였다. 이 파력 발전기 100기를 연안에 배치하여 파력발전 팜(farm)을 조성하여 100MW의 파력발전 단지의 조성을 실현할 수 있다.

3. 고온초전도 자석 기반 파력발전 연계 그린수소의 대량 생산 및 보급 실현

3.1 수소 사회로의 전 세계적 에너지 대전환

우리나라를 비롯한 세계 주요 선진국이 모두 2050 탄소중립을 선언하면서 급격한

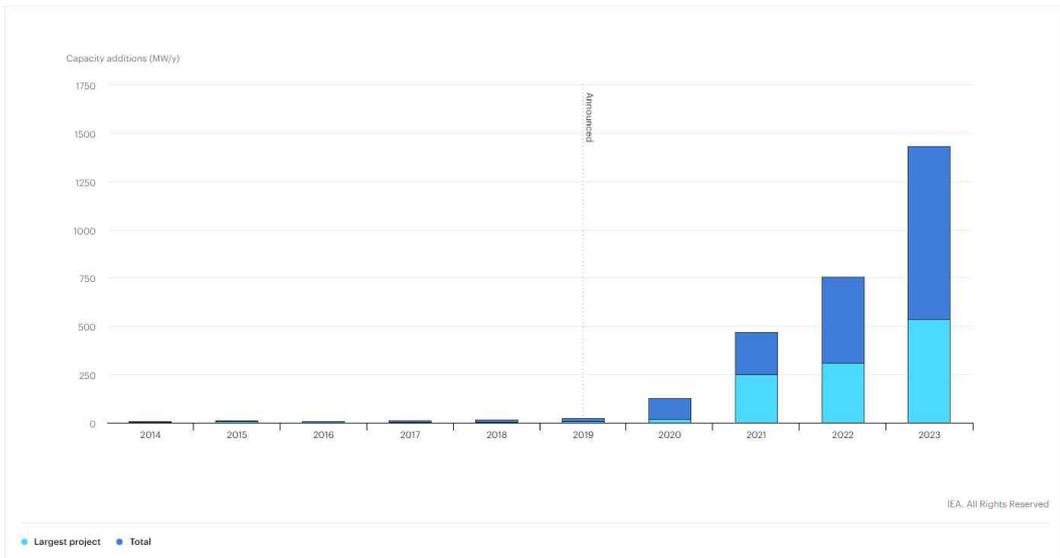


그림 7. 2014-2023년의 전세계 수전해 설비량 기록 및 예측 전망치 (출처: 세계에너지기구)

기후변화에 대처하기 위한 전 세계적인 발걸음이 빨라지고 있다. 특히 주요 선진국들을 중심으로 탄소에서 수소로의 에너지 대전환을 계획 및 시행하고 있다.

수소가 대체에너지로 부상하게 된 이유는 다른 자원에 비해 매우 풍부하게 존재하며, 고효율인 동시에 유해물질을 발생시키지 않는 특성에 있다. 수전해를 통해 생산된 수소는 연료전지를 통해 발전에 쓰이며, 그 결과 물이 나오는 탄소중립적인 순환을 이룬다.

뿐만 아니라 신재생에너지의 경우 변동성이 매우 심하고 이에 따른 수요공급의 불일치로 생산 가능한 에너지 중 약 30%만이 전력 계통에 연계되고 나머지 70%에 가까운 에너지는 회수되지 못하고 낭비되고 있는 상황이다⁹⁾. 전

9) 국토교통부, 상용급 액체수소 플랜트 핵심기술 개발 사업 기획보고서

세계적으로 신재생에너지가 매우 빠른 속도로 비중이 늘어나는 상황에서, 신재생에너지를 통해 생산한 에너지를 저장하는 에너지저장장치(ESS) 기술의 발달이 절박한 실정이다.

이러한 재생에너지의 저장 문제를 해결하기 위해 떠오르는 해결책은 생산된 전력을 가스로 변환하는 P2G(Power to Gas) 기술이다. 이 중 수소는 대용량 및 고밀도의 형태로 장기간 저장이 가능하고, 타 에너지원으로 변환하기에 최적의 에너지 캐리어(energy carrier)로 평가 받는다.

3.2 탄소중립 수소경제의 완성을 위한 그린수소로의 전환의 필요성

앞서 설명했듯 수소는 연료전지 발전을 통해 전기를 생산하는 과정에서 소음이나

공해물질 없이 물이 부산물로 나오는 특성을 가지고 있지만, 현재는 수소를 생산하는 과정에서 많은 이산화탄소 배출이 이루어지고 있는 실정이다.

현재 전 세계 연간 수소 생산량의 대부분은 천연가스에서 수소를 추출하는 방식이거나 제철, 석유화학 공정에서 부수적으로 생산되는 방식이 사용된다.

두 방식 모두 생산 과정에서 온실가스 배출을 수반하며, 완전한 탄소중립을 이루기 위해서는 신재생에너지를 활용해서 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 수전해 방식을 채택하여 온실가스 배출이 없는 그린수소의 생산량을 늘릴 필요성이 제기되고 있다.

3.3 액화수소의 장점 및 국가 전략적 필요성

3.3.1 타 저장 방식 대비 액화수소의 장점: (1) 안전성 (2) 뛰어난 저장 및 운송효율 (3) 낮은 요구면적

수소 저장방식에는 고압기체수소, 액화수소, 화합물 형태 등이 있다.

액상 유기 화합물에 수소를 저장하는 방식은 저장 용량이 높다는 장점에도 불구하고 저장되어 있던 수소를 활용하기 위해 화합물로부터 분리하는 과정에서 에너지 소모가 크다는 단점이 있다¹⁰⁾.

고압기체의 형태로 수소를 저장하는

10) 김수현, “수소 보급 활성화를 위한 저장 및 운송 기술 동향”, 오토저널, 2019.

방식은 수소의 부피 밀도가 낮다는 사실에서 착안하였다. 그러나 저장 및 운송의 효율이 액화수소에 비해 매우 저조하며, 도심지에서의 활용에 있어서 안전성의 문제도 제기된다. 이러한 이유로 효율적 저장 및 운송을 위해서는 중량과 부피당 에너지밀도가 가장 좋은 액화수소가 최적의 형태이다¹¹⁾.

액화수소의 단점으로는 높은 기술적 장벽이 있다는 점이었으나 이는 수소에너지에 대한 수요와 수소 인프라 구축과 함께 해결될 것으로 전망된다.

3.3.2 액화수소의 국가 전략적 필요성

액화수소는 그동안 우주선 발사체와 같은 국방전략 분야에서 제한된 용도로 주로 사용돼 왔다. 이러한 이유로 미국을 비롯한 해외 주요 선진국에서는 액화수소가 수출 금지 품목으로 분류되어 관리되고 있는 상황이다¹²⁾. 우주 발사체 분야, 그리고 장시간 제공하는 무인항공기 사업의 성장으로 액화수소의 전략적 가치와 그에 따른 핵심기술 확보의 필요성이 높아지고 있다¹³⁾.

II. 고온초전도 자석 기반 선형 파력발전기

11) 김서영, 최동규, “수소 액화, 저장기술 및 응용”, 공업화학 전망, 제21권 제3호, 2018.

12) 박성제, 최병일, 도규형 등, “수소액화 플랜트 기술 개발 현황 및 방향”, 기계저널, Vol. 57, No. 2, 2017.

13) 김서영, 최동규, “수소 액화, 저장기술 및 응용”, 공업화학 전망, 제21권, 제3호, 2018.

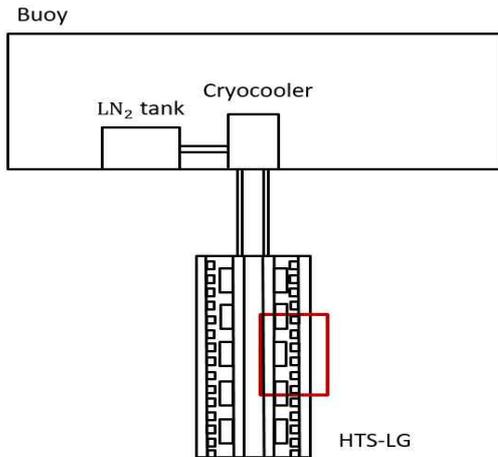


그림 8. 고온초전도 선형 파력 발전기 단면

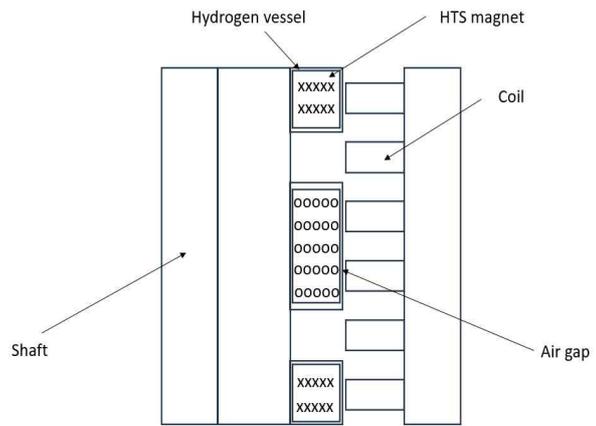


그림 9. 그림 8의 고온초전도 선형 파력 발전기 단면의 빨간 직사각형 영역의 확대 단면

1. 고온초전도 선형 파력 발전기의 개념 구조

고온초전도 선형 파력 발전기의 부표와 원통형의 발전기의 단면이 그림 8에 제시되어 있다. 부표 내부에는 고온초전도 자석의 냉각을 위한 액체수소탱크와 냉동기가 탑재되어 있다.

그림 9는 그림 8의 빨간 직사각형 영역을 확대한 단면 그림이다. 발전기의 정중앙 통로(shaft)는 공기가 점유하고 있는 빈 공간이다. 발전기의 경우 발전기의 중앙에 파도의 움직임에 따라 상하로 수직 왕복 운동을 하는 전기자가 위치한다. 초전도자석을 사용할 경우 전기자에 강자성체를 사용하지 않아도 고자기장을 구현할 수 있어 중량을 감소시키고 소형화에 유리한 소재를 사용할 수 있다. 전기자에 설치된 초전도자석은 YBCO 초전도 선재로

구성되어 있으며, 초전도선재에 전류를 흘려줌으로써 대전류에 의해 매우 큰 자기장을 만들어내는 전자석으로 기능하도록 한다. 초전도자석은 22K에서 운전하도록 설계되었으며, 냉각을 위해 초전도자석 바깥에 액화수소가 흐를 수 있는 냉각 채널이 존재한다.

초전도자석이 파도의 움직임에 따라 수직 왕복 운동을 하게 되면, 파력 발전기의 양 옆의 고정자에 설치된 구리 코일에 패러데이의 법칙에 의해 기전력이 유도되고 발전이 이루어진다.

본 논문의 고온초전도 자석을 활용한 선형 파력 발전기는 초전도 자석 대신 영구자석 또는 구리 코일로 구성된 파력 발전기에 비해 중량 및 부피에서 소형화를 이루어 비용의 큰 감소를 달성하거나, 동일 부피 및 질량 대비 월등한 출력 성능을 달성할 수 있다.

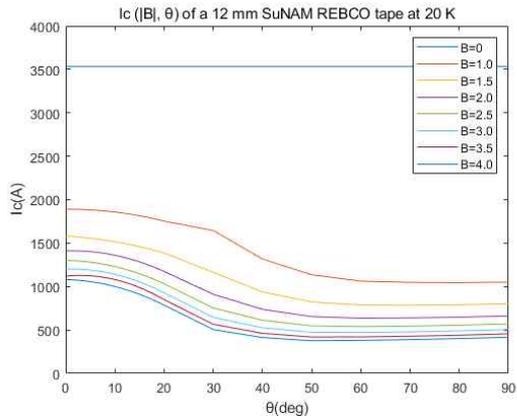


그림 10. 입사하는 자기장의 크기와 각도에 따른 초전도 선재의 임계 전류 크기

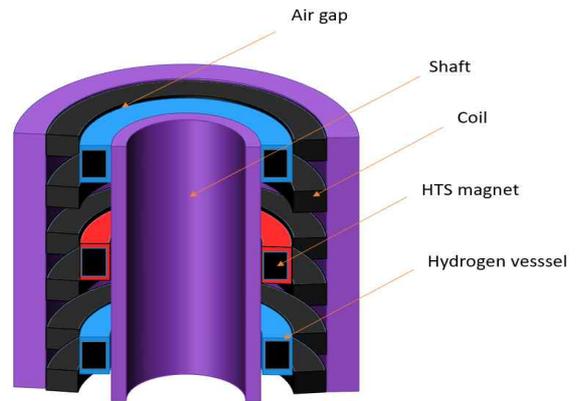


그림 11. 고온초전도 파력 발전기의 3차원 형상의 일부

파라미터	값	단위
전력	1	MW
파속	1	m/s
주파수	1.67	Hz
자석 개수	5	
코일 개수	15	
초전도 선재 전류 상의 개수	340	A
상 당 보빈 수	3	
상 당 보빈 수	2	
통로 반지름	102	mm
자석 높이	85	mm
자석 너비	87	mm
에어 갭	4	mm
수소 냉각부 높이	97	mm
수소 냉각부 너비	100	mm
코일 높이	50	mm
코일 너비	112	mm
동작부 높이	1.50	m
동작부 반지름	330	mm
전체 높이	1.50	m
전체 반지름	547	mm
권선 최대 전류	204.97	A
권선 종류	000	AWG
에어 갭 자속밀도	3.49	T

표 2. 고온초전도 파력 발전기의 설계 파라미터

아래의 표 2는 1MW 출력 달성을 위한 주요 설계변수 4가지와 설계 범위를 나타낸 것이다.

파라미터	범위 (mm)
전기자 높이	49 ~ 85
전기자 반지름	63 ~ 87
고정자 반지름	102 ~ 174
에어갭	4 ~ 19

표 2. 발전기 파라미터 설계 범위

2. 고온초전도 선형 파력 발전기 설계 최적화 및 최종 디자인

고온초전도 선형 파력 발전기의 출력을 최대화하기 위해서는 구리 코일을 통과하는 자속 밀도를 최대화 해주어야 한다. 이를 위해 초전도자석과 구리 코일 사이의 간격인 에어갭(airgap)을 줄이거나, 초전도자석에 흘리는 전류의 크기를 증가시켜 더 큰 자기장을 형성해줄 수

있어 임계 전류 값으로부터 안전 마진 10%를 확보한 상태에서 운전을 하도록 설계하였다.

III. 파력발전 연계 대규모 그린수소 생산 플랜트의 시스템 설계

1. 고온초전도 기반 파력 발전 팜(farm) 배치

그림 12는 본 논문에서 제안하는 고온초전도 기술 기반 파력 발전 연계 대용량 그린수소 생산 플랜트의 개념도이다.

있다.

그러나 초전도자석의 경우 초전도 상태를 벗어나지 않는 선에서 흘릴 수 있는 최대 전류인 임계 전류(I_c)가 존재한다. 임계 전류 값은 온도, 자기장의 크기, 자기장의 입사 방향 등 초전도 자석의 운전 상태에 따라 그 값이 크게 달라지며, 그렇기 때문에 설계된 파력 발전기에서 초전도 선재에 최대한 흘려줄 수 있는 전류 값을 계산하여 결정하는 것은 매우 중요하다.

작동 온도 22K에서의 YBCO 선재의 자기장의 크기와 입사 각도에 따른 임계 전류 값을 그림 10에 나타냈다. COMSOL Multiphysics 수치해석 프로그램을 활용한 분석 결과 초전도 선재에 340A를

해상풍력단지를 조성할 경우, 앞쪽에 위치한 풍력터빈에서 발생한 난류에 의해 뒤쪽 터빈의 출력이 감소하는 후류 효과를 최소화하기 위해 풍력터빈간의 이격거리 조정이 필수적이다. 터빈의 로터직경 D 에 대해 $3D \sim 7D$ 의 이격거리 범위에서는 이격거리가 클수록 출력의 감소율이 낮아진다는 결과가 보고된 바 있다¹⁴⁾. 이에 따라 전·후방 터빈 사이의

14) N. S. Choi, S. H. Nam, J. H. Jung, et al., "CFD study on aerodynamic power output of 6 MW offshore wind farm according to the wind turbine separation distance," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 8, 2011.

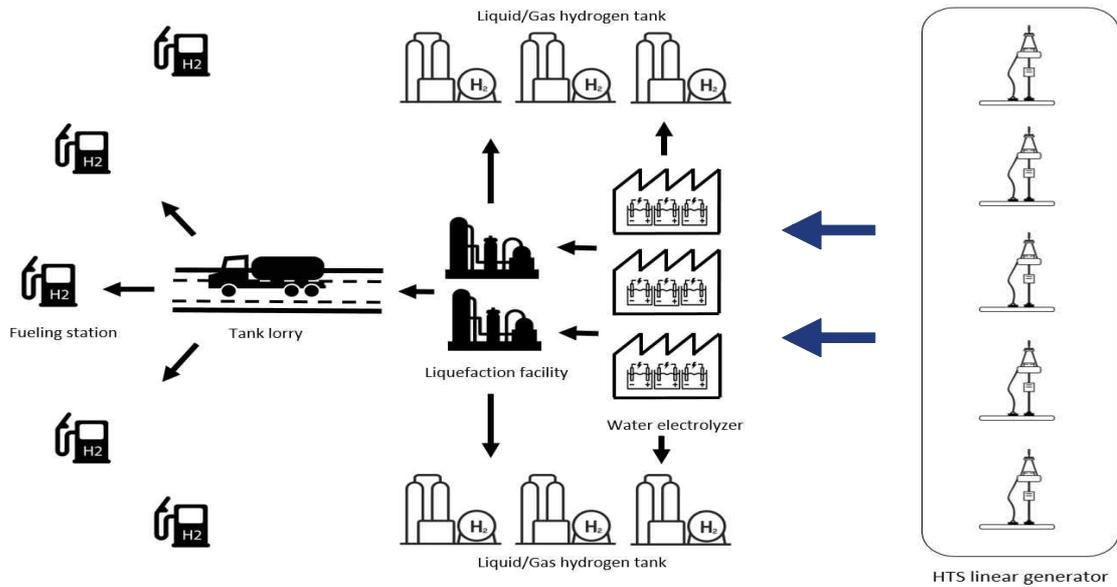


그림 12. 초전도 파력 발전 연계 그린수소 생산 플랜트 개념도

최소 2.5D의 이격거리를 확보하는 것이 일반적이다¹⁵⁾.

이에 반해 본 논문에서 설계된 점 흡수식 고온초전도 파력 발전기의 경우 부표 크기를 제외하면 발전기 사이의 이격거리에 제한을 받지 않으므로 상대적으로 조밀한 배치가 가능하여 요구 면적의 크기에서 유리한 조건을 가진다.

100개의 고온초전도 파력 발전기를 연안에 배치했을 때 100MW의 출력을 전달한다. 파력에너지의 변동성에 따른 출력 변동은 수전해 설비의 가동률 산정 시 고려하였다.

15) J.H. Kim, J.H. Jung, B.S. Kim, "Optimal arrangement of multiple wind turbines on an offshore wind-wave floating platform for reducing wake effects and maximizing annual energy production", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 3, 2017.

2. 파력 발전 연계 그린수소 생산 플랜트 설계 및 연간 수소 생산량 전망

수전해 설비의 경우 정부의 ‘수소 기술개발 로드맵(안)’에 따른¹⁶⁾ 2030년 목표치인 시스템 효율 50kWh/kg- H_2 의 100 MW급 알칼리 수전해를 가정하였다. 수전해 설비의 상시가동, 즉 가동률 100%를 가정한다면 본 플랜트에서의 연간 수소 생산량은 약 17,500t이다.

재생에너지의 변동성에 따라 수전해 설비의 가동률은 가변적이다.

재생에너지의 변동성을 감쇄시키면 수전해 설비의 가동률이 매우 높아지는데, 이 경우 그린수소의 경제성이 크게

16) 산업통상자원부, 수소 기술개발 로드맵(안), 2019.

NORMAL HYDROGEN
Properties of Vapor*

Temp °K	P = 1 atm (Sat temp = 20.39°K)			P = 2 atm (Sat temp = 22.97°K)			P = 5 atm (Sat temp = 27.29°K)			P = 10 atm (Sat temp = 31.41°K)			P = 15 atm		
	v cm ³ /g	h J/g	s J/g°K	v cm ³ /g	h J/g	s J/g°K	v cm ³ /g	h J/g	s J/g°K	v cm ³ /g	h J/g	s J/g°K	v cm ³ /g	h J/g	s J/g°K
(Sat Vapor)	751.1	718	39.16	398.7	729	37.16	162.7	730	34.21	70.89	691	31.62			
22	827.2	737	39.94												
24	917.6	760	41.00	425.0	742	37.71									
26	1006	782	41.93	474.4	767	38.72									
28	1094	804	42.75	522.0	791	39.60	172.4	742	34.64						
30	1180	826	43.50	569.2	814	40.40	197.2	774	35.72						
35	1393	880	45.16	680.1	871	42.13	251.0	842	37.81	104.7	782	33.75			
40	1603	933	46.52	788.7	926	43.60	299.5	903	39.45	135.2	860	35.86	37.29	636	28.51
45	1812	985	47.82	895.5	979	44.87	345.8	961	40.82	165.3	928	37.46	100.2	891	33.34
50	2019	1038	48.92	1001	1032	46.00	390.5	1017	42.01	187.0	990	38.78	119.2	962	35.82
60	2431	1143	50.84	1210	1139	47.93	477.6	1127	44.02	233.6	1108	40.92	152.4	1088	36.71
70	2842	1248	52.46	1418	1245	49.57	562.8	1236	45.69	278.1	1221	42.67	183.4	1207	39.02
80	3252	1354	53.88	1624	1352	51.00	646.9	1345	47.15	321.5	1334	44.17	213.1	1323	42.39
90	3661	1463	55.16	1829	1461	52.28	730.3	1456	48.45	364.2	1446	45.50	242.2	1438	43.74
100	4070	1574	56.32	2034	1572	53.45	813.3	1568	49.63	406.5	1561	46.70	271.0	1554	44.97
120	4886	1804	58.42	2444	1803	55.55	978.3	1800	51.74	490.1	1796	48.84	327.5	1791	47.12
140	5702	2046	60.28	2852	2045	57.41	1143	2043	53.61	572.8	2040	50.72	382.9	2037	49.02
160	6517	2298	61.97	3260	2297	59.10	1307	2296	55.31	655.4	2295	52.43	438.4	2293	50.73
180	7332	2559	63.50	3668	2558	60.64	1470	2558	56.85	737.6	2557	53.97	493.4	2556	52.28
200	8147	2826	64.91	4076	2826	62.05	1634	2826	58.26	819.7	2826	55.39	548.3	2826	53.70
220	8961	3100	66.21	4484	3100	63.35	1797	3100	59.57	901.6	3100	56.70	603.1	3101	55.01
240	9776	3377	67.42	4891	3378	64.56	1960	3378	60.78	983.4	3379	57.91	657.8	3380	56.23
260	10589	3658	68.55	5298	3658	65.69	2123	3659	61.90	1065	3661	59.04	712.3	3663	57.36
280	11401	3941	69.60	5704	3942	66.74	2286	3943	62.95	1147	3945	60.09	766.7	3947	58.41
300	12219	4227	70.58	6113	4228	67.72	2450	4229	63.94	1228	4231	61.07	821.3	4233	59.40

표 3. 수소의 온도 및 압력에 따른 비부피, 엔탈피, 엔트로피 값

개선된다는 보고되었다¹⁷⁾. 재생에너지의 변동성 완화를 위한 해결 방안은 활발히 연구되고 있으며, 특히 재생에너지로 생산한 수소를 저장해두었다가 연료전지 발전을 통해 출력변동 보상 전력으로 활용한다면, 수전해 설비의 가동률은 재생에너지의 변동성에도 불구하고 크게 개선되어 그린수소 생산량 및 경제성의 큰 폭의 증가를 가져올 것으로 예상된다.

수전해 설비를 통해 생산된 그린수소는 수소액화 설비로 이어져 액화 공정이 진행된 후 액화수소탱크에 저장되거나 도심으로 운송될 것이다. 수전해 설비에서

생산된 후 액화되지 않고 기체 상태로 고압수소의 형태로 저장도 가능하며, 플랜트에서 생산된 수소는 전부 도심의 수소 인프라로 공급되는 것이 아니라 일부는 연료전지 발전소로 공급되어 파력에너지의 출력변동을 보상하여 수전해 설비의 높은 가동률을 유지시키는 역할을 수행할 수 있다.

IV. 파력발전 연계 그린수소 생산, 운송 및 활용 전 주기 열역학 분석

1. 고온초전도 파력 발전기의 액화수소 냉각 과정 열역학 분석

액화수소는 극저온에서 가장 효율적인 냉각수이며, 특히 초전도자석의 냉각에 최적의 용매로 평가 받는다. 액화수소의

17) J.H. Park, C.H. Kim, H.S. Cho, et al., "Techno-Economic Analysis of Green Hydrogen Production System Based on Renewable Energy Sources", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 4, 2020.

임계점인 약 20K에서 초전도자석을 운전할 시 해당 온도에서 구리의 열전도도가 매우 높아져 자석의 과열을 막아 초전도자석의 운전 안정성을 더욱 높여주기 때문이다¹⁸⁾.

초전도 기기의 열부하로는 (1) 초전도 코일에서의 교류 손실, (2) 전류 도입선에서의 열전도, (3) 발전기 내 수직 통로(shaft) 혹은 보강구조물로부터의 복사 및 전도가 있다. 아래의 식을 통해 냉각 비효율을 계산한다¹⁹⁾.

$$\lambda_{sc} = 1 - \epsilon_{sc} = \frac{\dot{Q}_{\neq t}}{P_s} \quad (1)$$

λ_{sc} 는 냉각 비효율, ϵ_{sc} 는 냉각 효율의 의미하며, $\dot{Q}_{\neq t}$ 는 순(net) 열부하, P_s 는 기기의 정격 출력을 가리킨다.

일반적으로 1MW급 초전도 동기 발전기의 경우 약 2×10^{-5} 의 냉각 비효율을 나타낸다. 이를 본 논문에서 설계한 1MW급 고온초전도 파력 발전기에 적용할 경우 약 20W의 냉력이 요구되는 것을 알 수 있다.

발전기에서 요구하는 20W의 냉력을 액화수소의 냉력과 비교하면, 질량 흐름률을 3g/s라고 가정할 경우 냉각

채널에 들어가기 전 20.3K의 액화수소의 엔탈피 값은 표 3을 통해 718J/g임을 확인할 수 있다. 냉각을 통해 파력 발전기에서 발생하는 20W의 냉력을 모두 흡수한다고 가정하자. 따라서 아래와 같은 식이 성립한다.

$$(3) \left(\frac{g}{s} \right) * (h - 718) \left(\frac{J}{g} \right) = (20) \left(\frac{J}{s} \right) \quad (2)$$

냉각 채널을 빠져나온 수소의 엔탈피 값은 표 3에 따르면 약 725J/g이며, 기화되지 않고 여전히 액체 상태임을 확인할 수 있다. 이와 같이 액화수소의 기화잠열이 매우 크므로 초전도자석의 냉각이 원활히 이루어진다.

2. 수전해를 통한 수소 생산에서 활용까지 전 주기 열역학 해석

2.1 수소의 액화 공정 열역학 해석

수소의 액화 공정은 단열 팽창 시 온도가 감소하는 줄-톰슨 팽창 과정을 활용하며, (1) 압축, (2) 예냉(pre-cooling), (3) 팽창의 과정이 순서대로 진행된다.

압축 단계를 통해 300K의 수소는 약 20 bar의 압력을 나타내는 상태가 된다. 줄-톰슨 팽창 과정을 거치기 전에 예냉 과정이 필수적으로 진행이 되어야 한다. 그 이유는 압력변동에 따른 온도변화를 나타내는 줄 톰슨 팽창 계수가 음수일 경우 팽창 시에 오히려 온도가 상승하게 된다. 줄 톰슨 팽창 계수의 경우 온도와 압력에 의존하기 때문에, 수소가 20 bar의

18) W. Stautner, M. Xu, S. Mine, et al., "Hydrogen Cooling Options for MgB2-based Superconducting Systems", AIP Conference Proceedings, Vol. 1573, Issue 1, 2014.

19) R. Radebaugh, "Cryocoolers for aircraft superconducting generators and motors", AIP Conference Proceedings, Vol. 1434, No. 171, 2012.

높은 압력에서는 80K 이하에서 줄 톰슨 팽창 계수가 양수가 되고, 따라서 80K 이하까지 예냉을 진행시켜주어야 한다²⁰⁾.

예냉 과정에서는 수소 액화 용량에 따라 서로 다른 열역학 사이클을 공정에 채택하게 되는데, 하루 3톤 이상의 대용량 수소 액화를 진행할 경우에는 액화질소와 열 교환기를 사용하는 Claude cycle을 적용하고 3톤 미만일 경우에는 헬륨을 활용한 Brayton cycle을 적용한다²¹⁾.

예냉을 통해 80K 이하로 온도가 감소한 수소를 열 교환기를 통과하면서 약 40K로 냉각되고 이후 교축 과정(throttling process)을 통해 수소를 1.3 bar 수준의 낮은 압력으로 팽창시킨다. 과정이 완료되어도 수소 전체의 양 모두가 액화가 이루어지진 않는다. 기체 상태의 수소는 동일한 액화 과정을 재반복해서 통과하기 위해 사이클의 시작점으로 돌아가되, 돌아가는 경로에서 수소 액화가 진행되는 단계를 거침으로써 냉각을 돕도록 진행한다²²⁾.

수소의 액화 공정이 여타 가스의 액화 공정과 차이점을 보이는 부분은 액화 과정에서 ortho 수소를 para 수소로 변환이 필요하다. 이 변환이 액화 공정

도중에 일어나지 않았다고 가정하자. 상온의 수소는 ortho-수소와 para-수소의 비율이 75% 대 25%이고, 20K에서는 para-수소의 비율이 99.8%일 때 평형을 이룬다. 따라서 상온에서 20K로 수소를 빠르게 냉각시켰을 경우 ortho-para 변환의 대부분은 20K로 냉각이 이루어진 후에 일어나는데, 이때 발생하는 변환열이 액화수소의 증발잠열보다 크기 때문에 액화수소의 증발이 발생하여 저장탱크 내의 액화수소가 시간에 따라 양이 줄어드는 손실이 발생한다. 따라서 다양한 변환촉매를 넣어줌으로써 ortho-para 변환을 수소 액화 공정 내에 완료할 수 있게끔 처리한다²³⁾.

2.2 액화수소의 저장 및 운송 과정 열역학 해석

액화가 완료되고 저장 및 운송 시 최대한 모든 경로의 열전달을 차단하여 저장용기 내 액화수소의 손실을 방지해야 한다.

전도, 복사, 대류로 분류되는 열전달의 형태로 저장용기 내에 열침입이 발생하게 된다. 열유입을 차단하기 위한 대표적 저장용기 설계방식으로는 진공단열, 다층단열재(multi-layer insulation), 증기냉각 복사차단막 등이 있다²⁴⁾. 이후 운송은 튜브로리?를 활용해서 한다.

20) 김서영, 최동규, “수소 액화, 저장기술 및 응용”, 공업화학 전망, 제21권 제3호, 2018.

21) E. Connelly, M. Penev, A. Elgowainy, et al., “Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2019.

22) E. Connelly, M. Penev, A. Elgowainy, et al., “Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2019.

23) 백종훈, 김서영, “수소액화 및 극저온 저장기술”, 기계저널, Vol. 53, No. 4, 2013.

24) 백종훈, 김서영, “수소액화 및 극저온 저장기술”, 기계저널, Vol. 53, No. 4, 2013.

V. 파력발전 연계 대규모 그린수소 생산 플랜트의 경제성 분석

1. 액화수소 냉각에 따른 초전도 전력기기의 비용 감소 및 성능 향상

초전도 전력기기의 경우 액화수소의 등장 이전까지 냉각에 투입되는 비용으로 인해 경제성 측면에서 부각되기 어려웠다. 임계점이 4K인 액체 헬륨의 경우 전 세계적 공급 불안정으로 1리터 당 3만원으로 치솟는 등 단가가 매우 비싼 상황이다. 고온초전도 자석은 임계점이 77K인 액체 질소를 통한 냉각이 일반적이는데, 질소의 극저온 냉각에 투입되는 비용 역시 경제성을 떨어뜨렸다.

그러나 액화수소 같은 경우 기화잠열이 443kJ/kg로 액체 헬륨의 20.4kJ/kg, 액체 질소의 198.6kJ/kg에 비해 매우 크기 때문에 앞서 초전도 파력 발전기의 냉각 과정 열역학 해석에서 확인했듯 냉각 비용이 크게 감소한다.

초전도 파력 발전기 외에도 초전도 모터의 경우 수소 인프라의 보편화에 따른 냉각 비용 감소 효과가 매우 큰데, NASA의 경우 액화수소탱크를 탑재한 차세대 전기추진 항공기의 경우 연료용으로 탑재한 액화수소로 냉각이 충분해 별도로 냉각 장치를 탑재하지 않을 계획을 밝힌 바 있다.

2. 고압기체수소와 액화수소의 경제성

비교 분석

2.1 액화 및 운송에서의 경제성 분석

한국의 산업용 전기요금인 107원/kWh 수준을 적용해서 계산할 경우 수소 액화 과정에 kg당 1,000~1,500원의 비용이 추가된다. 그러나 이 비용은 액화수소 플랜트가 전 세계적으로 규모의 경제를 갖춤에 따라 하락할 뿐 아니라 액화천연가스(LNG)의 냉열을 수소 액화 공정에 활용하는 등의 공정 개선을 통해 그 비용은 고압의 기체수소로 만드는 공정과 비슷한 수준으로 가격이 하락할 수 있다. 아래 표를 확인해보면²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾

	이론효율 (kWh/kg)	실제효율 (kWh/kg)
700 bar 압축	1.4	3
700 bar 액화수소펌프	0	0.4
액화	2.8	10 ~ 15
LNG 에너지를 활용한 액화 (냉각 수소 재활용)	1.4	3.6

표 4. 고압기체수소 및 액화수소의 효율

25)최병일, “액체수소 기반 수소사회 인프라 구축 방안”, 초전도와 저온공학, 22권 1호, 2020.

26)M. Gardiner, “Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record #9013. 2009.

27)A. Kuendig, K. Loehlein, G. J. Kramer, et. als, Large scale hydrogen liquefaction in combination with LNG re-gasification, Proc. of the 16th World Hydrogen Energy Conference, 2006.

1kg의 액화수소를 생산할 때 10kWh 이상의 소모 전력량은 1kg의 기체수소를 고압으로 압축하는 과정보다 3배 이상이다. 그러나, 앞서 설명한 수소를 액화 과정에서 예냉 단계에서 LNG의 LNG의 냉열을 공급받게 된다면 소모 전력량은 3.6kWh으로 감소하여 비용경쟁력을 갖추게 된다²⁸⁾.

운송 단계에서는 액화수소가 기체고압수소에 비해 다양한 우위를 지니고 있다. 첫째로 운송 효율의 경우, 아래의 표 5에서 확인하듯이²⁹⁾, 한번에 운송 가능한 수소의 용량에서 10배 이상의 차이가 발생함에 따라 액화수소의 운송효율 역시 10배 이상 우수하다.

수소운송방법	수소 (kg)
튜브 트레일러 용량범위	106~295
액화수소 탱크로리 용량범위	2,363~4,253

표 5. 기체고압수소 및 액화수소의 운송용량범위

2.2 충전소에서의 경제성 분석

또한 도심 곳곳에 설치 예정인 수소충전소 및 도심 인근의 분산 연료전지 발전소를 고려했을 때, 상압에 가까운 압력으로 운송 및 저장하는

28)최병일, “액체수소 기반 수소사회 인프라 구축 방안”, 초전도와 저온공학, 22권 1호, 2020.

29)김서영, 최동규, “수소 액화, 저장기술 및 응용”, 공업화학 전망, 제21권 제3호, 2018.

액화수소가 안전성 면에서 더욱 부각된다.

고압기체수소 방식의 충전소는 수소차의 700 bar에서의 충전을 위해 기체수소를 추가로 압축해주어야 하고, 이 과정에 쓰이는 고압압축기는 액화수소 방식의 유사한 기능을 수행하는 액체수소펌프에 비해 비용이 8배에 이르는 것으로 알려져 있다³⁰⁾. 또한 고압 고속 충전을 위해 수소를 -40℃까지 낮추는 데 쓰이는 냉동기가 필요하다. 반면 액화수소 방식의 충전소에서는 액화수소펌프와 기화기를 활용해 곧장 수소차에 충전이 가능한 방식이다. 고압압축기에 비해 훨씬 저렴한 액화수소펌프를 활용할 뿐만 아니라 액화수소의 기화열을 활용하는 덕분에 냉동기의 필요를 제거하여 투자비에서의 상당한 절감이 가능하다³¹⁾.

수소충전소의 설비 면적에서도 약 120평 이상의 면적을 요구하는 고압기체수소 방식 충전소에 비해 액화수소 기반 충전소의 경우 6평 수준의 면적을 요구해 20배 이상의 차이를 보인다. 이에 따른 초기 투자비 및 부지 선정의 제약 측면에서 액화수소 수소충전소가 매우 유리한 위치에 있다.

VI. 결론

30)김서영, 최동규, “수소 액화, 저장기술 및 응용”, 공업화학 전망, 제21권 제3호, 2018.

31)김서영, 유용호, “액화수소 기반 수소 충전소”, 한국가스학회 2017년도 봄 학술대회 논문집, 2017.

태양광과 풍력에 편중된 국내의 신재생에너지 믹스에서 파력은 이론적 잠재 설비용량 129GW, 기술적 잠재 설비용량 18GW의 풍부한 잠재 발전량 및 해상풍력 또는 해상태양광과의 연계 발전의 가능성도 지닌 잠재력이 큰 신재생에너지원이다.

특히 고온초전도 분야 상용화의 최대 난제였던 퀘치(Quench) 사고로 인한 운전 불안정성을 해결한 무절연 고온초전도 기술을 바탕으로 본 논문에서 설계한 고온초전도 파력 발전기는 상전도 기기 대비 고자기장을 구현함과 동시에 소형화를 달성하였다. 이에 따라 1MW급의 파력 발전기를 연안에 기타 해상에서 이루어지는 재생에너지 대비 적은 면적에 배치하여 대규모 발전을 가능케 하였다.

고온초전도 기반 대규모 파력 발전과 연계되어 지상에 배치된 수전해 설비, 수소액화 설비 및 연료전지 설비 등은 생산 과정에서 온실 가스를 전혀 배출하지 않는 그린수소를 연간 17,500 t을 생산함으로써 탄소중립 수소경제 달성에 크게 기여할 것으로 예상된다. 삼면이 바다인 우리나라의 지형의 장점을 살려서 파력 발전 연계 그린수소 생산 플랜트가 구축된다면 수소 밸류체인 전반의 기술 개발에 힘입어 연간 수소 100만 t 생산 역시 미래에 충분히 내다볼 수 있는 목표로 보인다.

또한 저장 및 운송 효율, 도심을 비롯한 전국에 분산된 인프라에서 사용되기 위해

필수적인 안전 문제, 충전소 비용 등을 본 논문에서의 열역학 해석 및 경제성 분석을 통해 고려해보았을 때 앞으로의 수소 인프라는 액화수소가 중심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

이뿐 아니라 이전부터 주요 선진국의 수출 금지 품목으로 우주 발사체 사업, 국방 분야에 활용되었던 만큼, 다가오는 미래에 액화수소는 도심 인프라 및 자동차, 항공모빌리티 뿐 아니라 우주 산업 및 초전도 응용 산업 등 국가 전략적 분야에서도 매우 중요하게 활용될 것으로 전망된다.

- 국토교통부, “상용급 액체수소 플랜트 핵심기술 개발 사업 기획보고서”, (2018)
- 김서영, 유용호, “액화수소 기반 수소 충전소”, 한국가스학회 2017년도 봄 학술대회 논문집, (2017)
- 김서영, 최동규, “수소 액화, 저장기술 및 응용”, 공업화학 전망, 제21권 제3호, (2018)
- 김수현, “수소 보급 활성화를 위한 저장 및 운송 기술 동향”, 오토저널, (2019)
- 박성제, 최병일, 도규형 등, “수소액화 플랜트 기술 개발 현황 및 방향”, 기계저널, Vol. 57, No. 2, (2017)
- J.H. Park, C.H. Kim, H.S. Cho, et al., “Techno-Economic Analysis of Green Hydrogen Production System Based on Renewable Energy Sources”, Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 4, (2020)
- 백중훈, 김서영, “수소액화 및 극저온 저장기술”, 기계저널, Vol. 53, No. 4, (2013)
- 산업통상자원부, 수소 기술개발 로드맵(안), (2019)
- 산업통상자원부, 한국에너지공단 신재생에너지센터, 2020 신재생에너지백서, (2020)
- 산업통상자원부, 재생에너지 3020 이행계획(안), (2017)
- N. S. Choi, S. H. Nam, J. H. Jung, et al., “CFD study on aerodynamic power output of 6 MW offshore wind farm according to the wind turbine separation distance,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 8, (2011)
- 최병일, “액체수소 기반 수소사회 인프라 구축 방안”, 초전도와 저온공학, 22권 1호, (2020)
- S. Clarke, “Aircraft Electric Propulsion Systems: Applied Research at NASA”, 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, (2015)
- E. Connelly, M. Penev, A. Elgowainy, et al., “Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, (2019)
- A. Kuendig, K. Loehlein, G. J. Kramer, et. als, Large scale hydrogen liquefaction in combination with LNG re-gasification, Proc. of the 16th World Hydrogen Energy Conference, (2006)
- M. Gardiner, “Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record #9013. (2009)
- S. Hahn, D. Park, J. Bascuñán, et al., “HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, No. 3, (2011)
- Hahn, S., Kim, K., Kim, K. et al., “45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet”, Nature 570, (2019)
- R. Radebaugh, “Cryocoolers for aircraft superconducting generators and motors”, AIP Conference Proceedings, Vol. 1434, No. 171, (2012)
- X. Song, C. Bühner, P. Brutsaert, et al., “Ground Testing of the World’s First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator”, IEEE Trans. Energy. Conv. Vol. 35, No. 2, (2020)
- W. Stautner, M. Xu, S. Mine, et al., “Hydrogen Cooling Options for MgB₂-based Superconducting Systems”, AIP Conference Proceedings, Vol. 1573, Issue 1, (2014)
- T. Winkler and on behalf of the EcoSwing Consortium, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., (2019)
- X. Wang, S. Hahn, Y. Kim, et al., “Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation ReBCO pancake coil”, Supercond. Sci. Technol., Vol. 26, No. 3, (2013)

1) S. Hahn et al.,

12. 참고문헌은 본문의 마지막에 장을 달리하여 기재하며, 기재순서는 국문문헌(가나다 순), 외국어 문헌(알파벳 순)의 순서로 기재합니다.

① 국문도서 : 저자명, 도서명, 출판수, 출판사명, 연도 순으로 적을 것

② 국문 학술지 : 저자명, 논문제목, 잡지명, 권호, 연도, 쪽번호 순으로 적을 것. 논문제목에는 따옴표(" "), 연도는 괄호로 묶을 것

③ 외국도서 : 저자명(대표저자 성, initial, 공동저자 성, initial), 도서명, 출판사, 출판지, 연도

④ 외국학술지 : 저자명(도서와 같은 형식), 논문제목, 잡지명, Vol, No, 연도, 쪽번호순으로 적을 것. 논문제목은 따옴표로 묶고, 연도는 괄호로 묶을 것